

Efectos topográficos, de sitio e interacción estructura-suelo-estructura. Un caso de estudio

Topographical, site and structure-soil-structure interaction effects. A case of study

Fecha de entrega: 25 de enero 2022

Fecha de aceptación: 12 de abril 2022

Julio Sucasaca y Esteban Sáez

Departamento de Ingeniería Estructura y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Macul, Chile, jcsucasaca@uc.cl, esaez@ing.puc.cl

En este trabajo se investiga los efectos de la topografía en forma de talud, efectos de sitio, y la interacción dinámica entre edificios cercanos de muros de corte ubicados en una pendiente costera arenosa. Para ello, se desarrolló un modelo numérico basado en edificios y sitios reales que fue calibrado y tomado como caso de estudio. Se realizaron análisis de propagación de ondas para derivar factores de amplificación topográfica y evaluar el comportamiento de los edificios ante diferentes escenarios. Se encontró que el perfil superficial del sitio tiene gran impacto en la respuesta dinámica de edificios rígidos pequeños. Además, se muestra que el escenario de estructura-suelo-estructura tiene efectos adicionales despreciables desde un punto de vista práctico respecto al escenario de suelo-estructura. Los resultados sugieren tener precaución en el diseño de edificios de baja altura rígidos ubicados cerca de la cresta de un talud.

Palabras clave: efectos topográficos, interacción estructura-suelo-estructura, propagación de ondas, análisis dinámico no lineal

In this work, we investigate the influence of slope topography, site effects and dynamic interaction between shear-wall buildings located closely on a sandy coastal scarp. To this end, a numerical model is developed based on real site and buildings properties calibrated and taken as case of study. Wave propagation analyses are conducted to derive topographical amplification factors and to assess dynamic buildings responses for different scenarios. It was found that the surface profile of the site has a large effect on the dynamic response of low-rise stiff buildings. Moreover, it is shown that structure-soil-structure scenario has negligible effect from a practical point of view in comparison to soil-structure interaction. The results suggest that care should be taken in the design of low-rise stiff buildings located near a slope crest.

Keywords: topographical effects, structure-soil-structure interaction, wave propagation, nonlinear dynamic analysis

Introducción

Durante eventos sísmicos, las ondas sísmicas se propagan desde la fuente hacia el sitio, causando cargas dinámicas en estructuras civiles. Estas estructuras interactúan con el suelo circundante, conllevando a la interdependencia entre las respuestas estructurales y las respuestas del suelo.

La interacción suelo-estructura (SSI) es raramente considerada de forma explícita en los análisis sísmicos de estructuras, pero existen numerosas investigaciones al respecto, las que generalmente consideran edificios únicos ubicados sobre suelos con superficie horizontal. Sin embargo, muchas veces las estructuras en áreas

urbanas se encuentran cercanas entre sí, y están ubicadas sobre topografías irregulares. Este es el caso de muchos complejos habitacionales emplazados en taludes costeros.

La SSI ha sido un área de investigación activa por décadas, donde se usaron métodos analíticos y numéricos principalmente propuestos para la industria de energía nuclear como se describe en Kausel (2010), Menglin *et al.* (2011) y Roesset (2013). Más recientemente, la interacción estructura-suelo-estructura (SSSI), un sub-área que incluye los efectos adicionales de interacción entre edificaciones cercanas, fue explorada debido a la densificación de áreas urbanas. En general, estos análisis evalúan la modificación

de las respuestas dinámicas estructurales y del suelo respecto al mismo edificio soportado por una base rígida. Esta modificación de la respuesta se debe principalmente a: (1) estratigrafía del suelo, (2) efectos topográficos, (3) disipación de energía por radiación desde las estructuras hacia estratos profundos de suelo, (4) comportamiento inelástico del suelo, (5) desarrollo de presiones de poro, (6) comportamiento inelástico de las estructuras, (7) evolución del contacto en la interface suelo-estructura, (8) efectos de interacción dinámica entre edificaciones cercanas y (9) intensidad, duración y contenido de frecuencias de las señales sísmicas de entrada.

Los efectos de sitio en la modificación del movimiento sísmico también fueron estudiados por décadas, e igualmente los efectos topográficos ganaron interés (Paolucci, 2002; Assimaki *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2018). Sin embargo, existen pocos estudios que incluyen los efectos de SSI en conjunto con topografías irregulares de la superficie del terreno (Alitalesh *et al.*, 2018; Assimaki y Kausel, 2007), y de la misma forma los estudios de SSSI son limitados a modelos sencillos (Luco y Contesse, 1973; Wong y Trifunac, 1975; Vicencio y Alexander, 2018), y muy pocos consideran modelos refinados (Han *et al.*, 2020; Bolisetti y Whittaker, 2020). De la revisión literaria, los efectos topográficos en edificaciones emplazadas cerca de la cresta de un talud, combinado con los efectos de interacción entre edificaciones cercanas, y considerando la no-linealidad del suelo, modificarán de forma compleja las demandas sísmicas, y a priori no es claro si estos efectos serán beneficiosos o perjudiciales.

Debido a que la combinación de estos tres efectos es común en muchos proyectos residenciales, el objetivo principal de este estudio es evaluar numéricamente la influencia de los efectos topográficos y la interacción dinámica entre edificios cercanos ubicados en un talud costero arenoso, en la respuesta sísmica de edificios medianos de muros de corte, tomando edificios reales como caso de estudio y considerando la interacción dinámica no-lineal estructura-suelo-estructura.

Caso de estudio

El caso de estudio seleccionado es representativo de edificaciones típicas ubicadas en taludes arenosos a lo largo de sitios costeros como en la región de Valparaíso en Chile o el departamento de Lima en Perú. Este consiste

en un proyecto residencial formado por dos edificaciones independientes de muros de concreto armado. La primera es de pequeña altura de 8 niveles ubicada cerca de la cresta del talud, y es usado como parqueo vehicular (edificio “P”) y está cimentada sobre micropilotes en sus muros perimétricos y centrales. La segunda es de mediana altura de 28 niveles ubicada a media altura del talud, es usada como torre de departamentos (edificio “A”), con estructuración típica chilena de tipo “espina de pescado” (Westenenk, 2013) y está cimentada sobre pilas de 10 m de largo y losa de fundación de 1.2 m de espesor. El talud considerado en este estudio tiene una pendiente media de 30° y aproximadamente 90 m de altura. El estrato superficial es una arena superficial poco densa (arena de duna), con un espesor aproximado de 5 m, y aumenta su cementación con la profundidad (duna vieja). El nivel freático es suficientemente profundo para desprestigiar sus efectos. El sistema de contención de tierras usado fue pilas ancladas discontinuas con cobertura horizontal de madera y concreto proyectado, usando entre 2 y 6 filas de anclajes. Ambos edificios se encuentran suficientemente separados del sistema de contención tal que se evite el golpeo entre ambas estructuras. La Figura 1 muestra la vista global y en planta de las edificaciones y el talud; y la sección 2D seleccionada para el análisis.

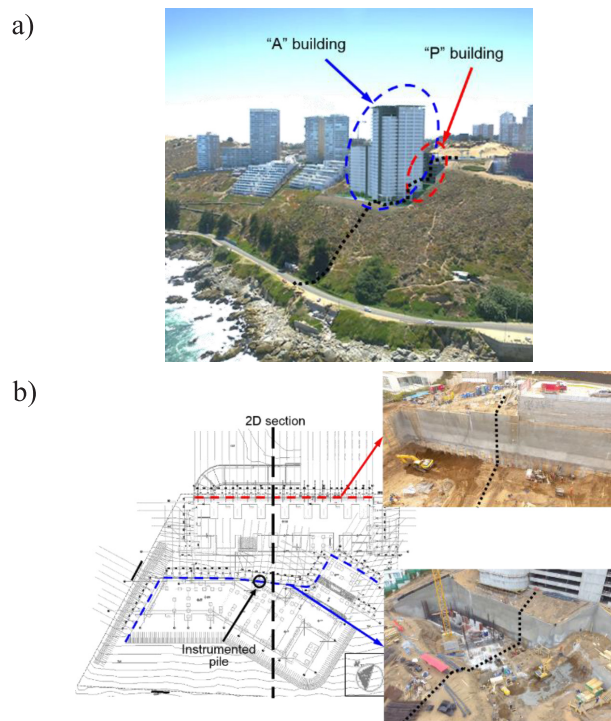


Figura 1: a) Vista general y b) en planta del caso de estudio

Se realizó una investigación geotécnica en el sitio incluyendo perforaciones geotécnicas de 30-40 m para SPT y se extrajeron muestras de suelos, el perfil de velocidades de la onda de corte se midió con técnicas basadas en dispersión de ondas de superficie. Se realizaron ensayos triaxiales para determinar parámetros de resistencia, y ensayos de torsión cíclica y columna resonante para determinar curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento. Además, una de las pilas ancladas fue instrumentada con un inclinómetro, teniéndose las medidas de deflexión (Raddatz y Taiba, 2018).

Modelamiento numérico

Modelo de elementos finitos y calibración

Se realizó un modelo 2D equivalente de deformaciones planas y elementos finitos del sistema suelo-estructura. Primeramente, se construyeron modelos 3D completos de los edificios en base fija para rescatar los parámetros modales de masa sísmica, frecuencias y formas modales. Luego, modelos sencillos de los ejes estructurales representativos de los edificios en la dirección del talud fueron calibrados mediante un proceso de optimización. Esto se muestra en la Figura 2.

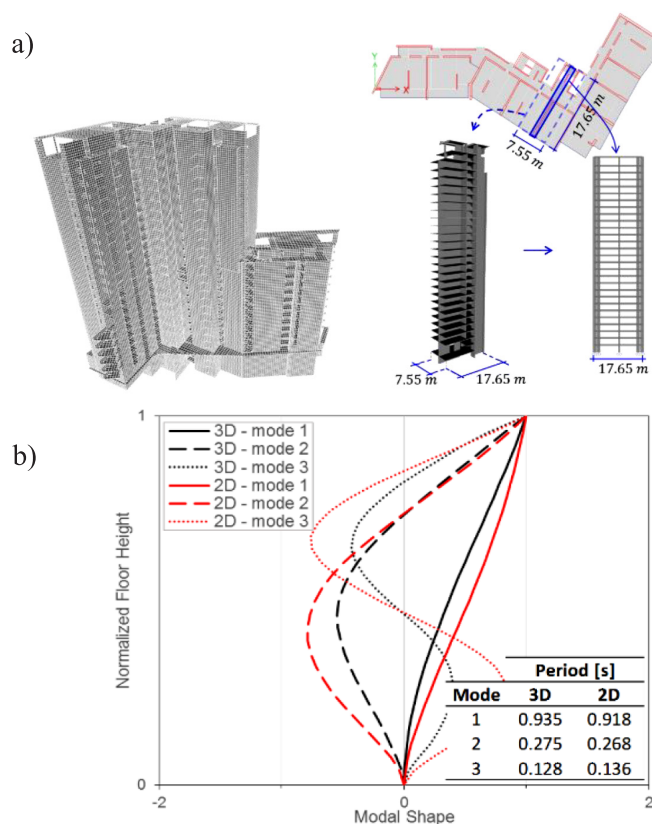


Figura 2: a) Modelo numérico del edificio “A” y b) calibración y propiedades modales

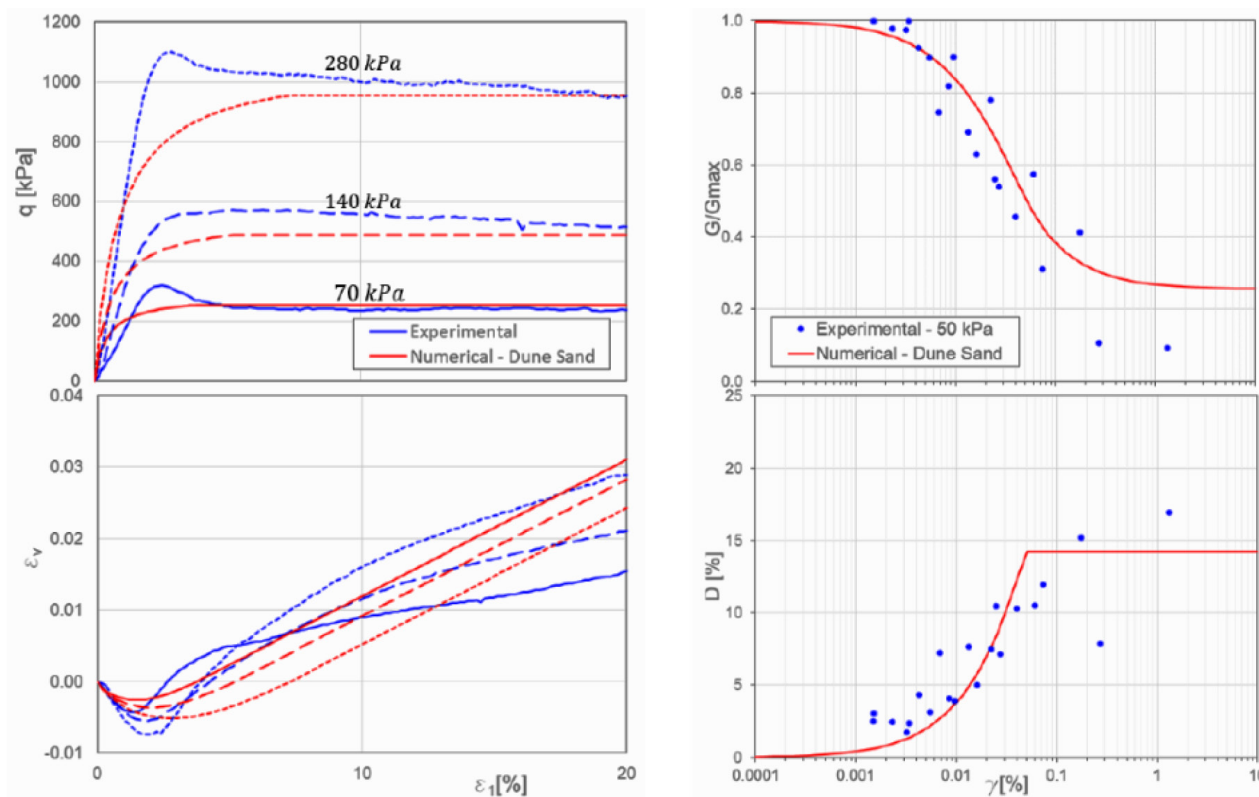


Figura 3: Curvas experimentales y numéricas del comportamiento del suelo

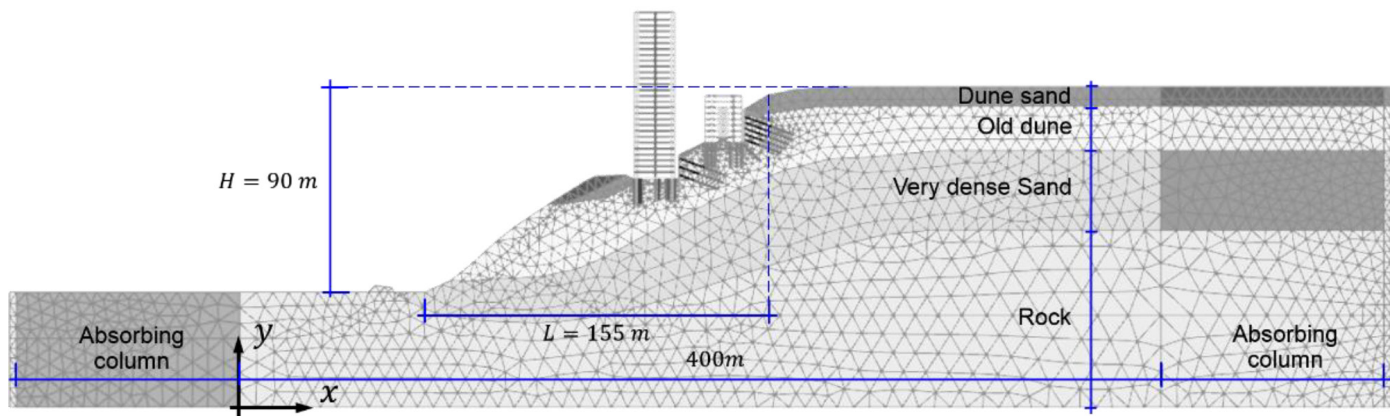


Figura 4: Vista general del modelo de elementos finitos.

El comportamiento cíclico elasto-plástico del suelo se modeló usando el modelo de endurecimiento de suelo con rigidez en pequeñas deformaciones (Benz, 2007). Las trayectorias experimentales y numéricas para ensayos triaxiales, y las curvas de degradación se muestran en la Figura 3 observándose un buen ajuste.

Las pilas ancladas, pilas y pilotes de cimentación, interfaces suelo-estructura, condiciones de borde de campo libre, anclajes, pre-esfuerzos, etapas de excavación y construcción de niveles de los edificios fueron también consideradas en el modelo numérico. La malla de elementos finitos consistió en elementos triangulares de 15 nodos, asegurando que existan al menos 12 nodos en la longitud de onda más pequeña relacionada a la máxima frecuencia de la señal de entrada. El modelo numérico se observa en la Figura 4.

Como validación del modelo de elementos finitos, en las Figuras 5a y 5b se comparan las mediciones de deflexión de la pila instrumentada y el perfil de velocidades de la onda de corte del sitio con el modelo numérico, teniéndose un ajuste razonable.

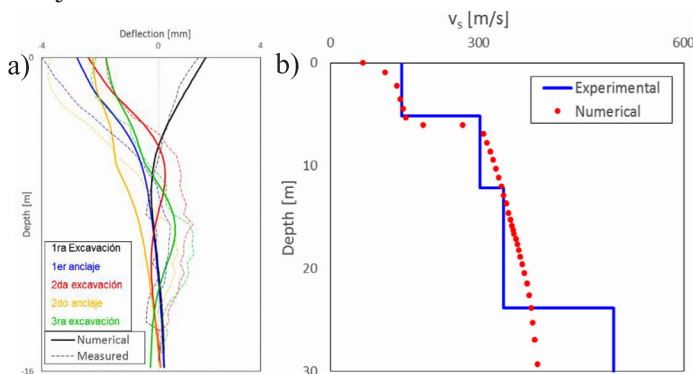


Figura 5: Validación del modelo numérico: a) con mediciones de deflexión de la pila instrumentada y b) con el perfil de velocidades de la onda de corte del sitio

Efectos topográficos, SSI y SSSI

Primero, se evaluó el potencial de amplificación o deamplificación de la señal sísmica debido a efectos topográficos, para ello, se definió un factor de amplificación topográfica (TAF) como extensión a propuestas anteriores (Papageorgiou y Kim, 1991; Assimaki *et al.*, 2005) de la siguiente forma:

$$TAF(x, f) = \frac{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_x(x, t)\}|_{2D}}{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_x(x, t)\}|_{1D}} \quad (1)$$

Donde x es la coordenada horizontal, f la frecuencia, $\ddot{u}_x(x, t)$ la aceleración horizontal en superficie, $|\mathcal{F}\{\cdot\}|$, la amplitud de la transformada de Fourier del argumento, y los subíndices 1D y 2D hacen referencia al tipo de modelo numérico usado. Se consideraron 3 tipos de escenarios: (1) casos de talud idealizados, (2) casos de campo libre y (3) casos de talud con excavación.

Luego, para evaluar los efectos de interacción del suelo con las estructuras se definieron dos razones espectrales: $|H_{\ddot{u}_x}|$ y $|H_{AVZ}|$. El primero muestra el comportamiento estructural, mientras que el segundo muestra un amplio panorama de la interacción suelo-estructura. La j -ésima componente de la primera razón es:

$$H_{\ddot{u}_{xj}} = \frac{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_{piso-j}\}|}{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_{base}\}|}_{FB, SSI, SSSI} \quad (2)$$

donde \ddot{u}_{piso-j} es la aceleración absoluta del j -ésimo nivel de la estructura, \ddot{u}_{base} es la aceleración absoluta a nivel de cimentación, los subíndices FB, SSI y SSSI referencian al escenario considerado. La segunda razón es:

$$H_{AX} = \frac{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_x\}|_a}{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_x\}|_b}, H_{AZ} = \frac{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_z\}|_a}{|\mathcal{F}\{\ddot{u}_z\}|_b} \quad (3)$$

donde \ddot{u}_x y \ddot{u}_z son la aceleración absoluta horizontal de la superficie del suelo, y los subíndices a y b hacen referencia a uno de los escenarios considerados: (1) ambos edificios de base fija (FB), (2) edificios individuales en base flexible (SSI) donde solo la excavación y el sistema de contención de tierras del edificio adyacente es considerado y (3) ambos edificios en base flexible (SSSI).

Señales de entrada

Para realizar los análisis dinámicos no-lineal, se usaron cuatro onduletas del tipo Ricker con diferentes frecuencias centrales (f_0) de 0.8, 1.5, 2.5 y 5 Hz que cubren el rango de frecuencias de interés, sus amplitudes se ajustaron para desencadenar diferentes niveles de no-linealidad (Figura 6a). Adicionalmente, se usaron dos señales sísmicas de

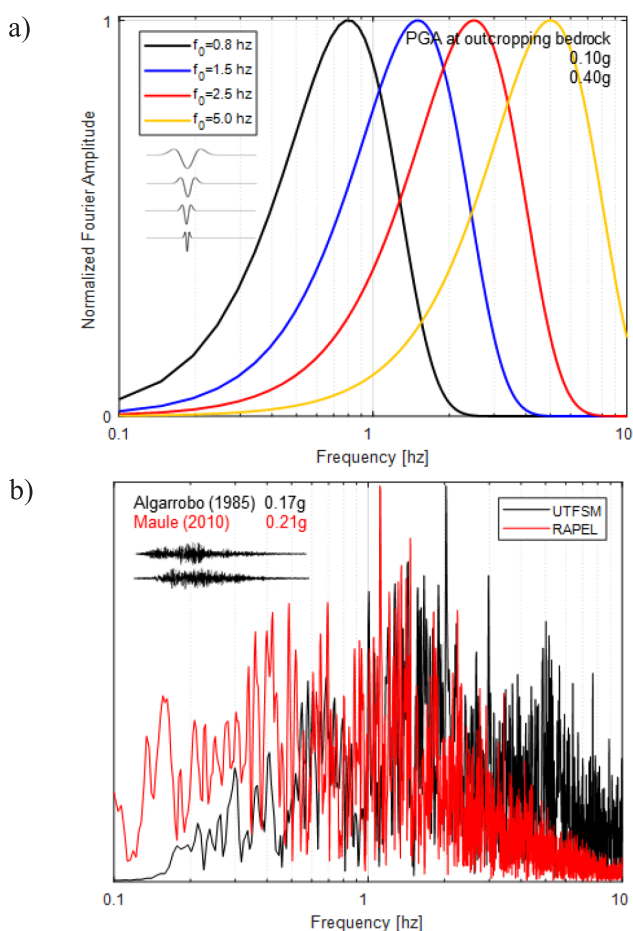


Figura 6: Espectros de Fourier de aceleración de las señales de entrada: a) Ricker y b) sismos

terremotos de campo lejano registrados en instrumentos en roca correspondientes a los sismos de Algarrobo 1985 y el Maule 2010 en Chile (Figura 6b).

Resultados y discusión

Efectos topográficos

En la Figura 7 se muestra el TAF en el dominio distancia-frecuencia para escenarios idealizados lineales y con señales de entrada de onduletas tipo Ricker. El caso simplificado muestra la tendencia de concentrar valores máximos de TAF, detrás de la cresta del talud debido a las interferencias constructivas (y destructivas) de las ondas en la superficie del modelo, y a la diferencia de fase y superposición de ondas P y ondas de Rayleigh que se generan por la difracción de las ondas incidentes en la superficie del talud. Se tiene $TAF = 2$ para el rango de frecuencias de $f \geq 3.4$ Hz, que corresponde a la solución de f para la inecuación $\lambda/H \leq 1$, la longitud de onda característica de la señal de entrada es comparable o más pequeña que la altura del talud, e interactúan. El caso homogéneo muestra que pequeños cambios en la superficie topográfica cambian significativamente la ubicación de los valores máximos del TAF. El caso estratificado muestra que las ondas incidentes son atrapadas mediante múltiples reflexiones y refracciones en los estratos superficiales del sitio, interactuando así con las componentes de alta frecuencia de la señal; y además, de acuerdo a la ley de Snell, la dirección de propagación de las ondas es sesgada hacia la izquierda del modelo. Por otro lado, al ser casos lineales, existen fuertes contrastes de impedancia en los estratos, lo que produce valores del TAF sobrevalorados.

Desde luego, incluso para sismos moderados, el suelo se comporta de forma no-lineal. Esto es considerado en la Figura 8. La no linealidad da un mejor estimado del TAF, donde la incursión inelástica y disipación de energía de estratos superficiales actúan como un filtro pasa bajos que tiende a disminuir los valores del TAF en altas frecuencias. El escenario de campo libre muestra que el patrón del TAF se mantiene similar a los escenarios lineales cuando se usa señales del tipo Ricker y señales sísmicas. Además, es interesante notar que el Eurocódigo 8 (EN1998-1, 2004) sugiere $TAF \geq 1.4$ independiente de la frecuencia, lo que de acuerdo a nuestros resultados, podría ser no-conservador hasta en 43%, para algunas frecuencias y ubicaciones a lo largo del talud de este caso de estudio.

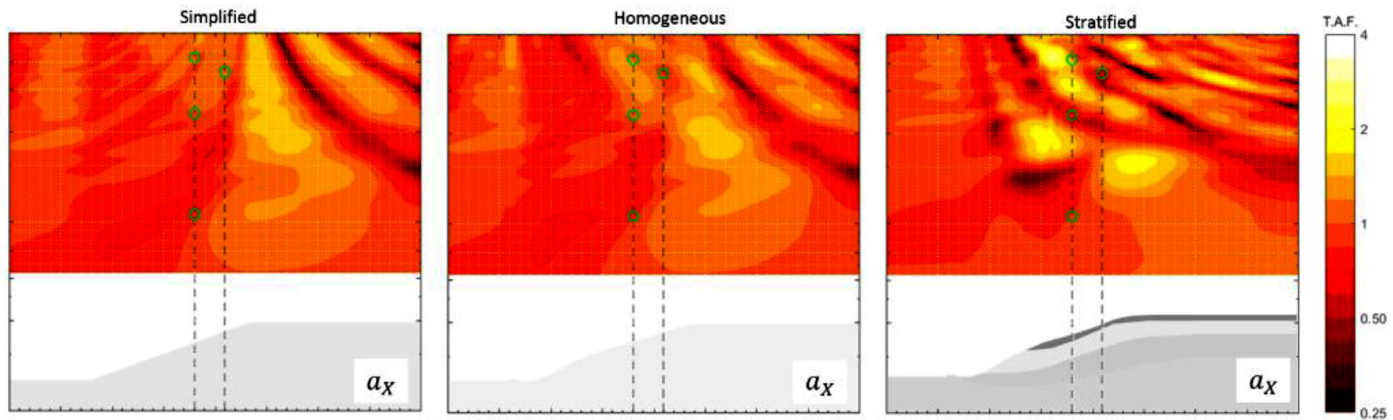
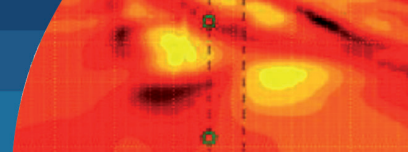


Figura 7: Factores de amplificación topográfica (TAF) en escenarios idealizados

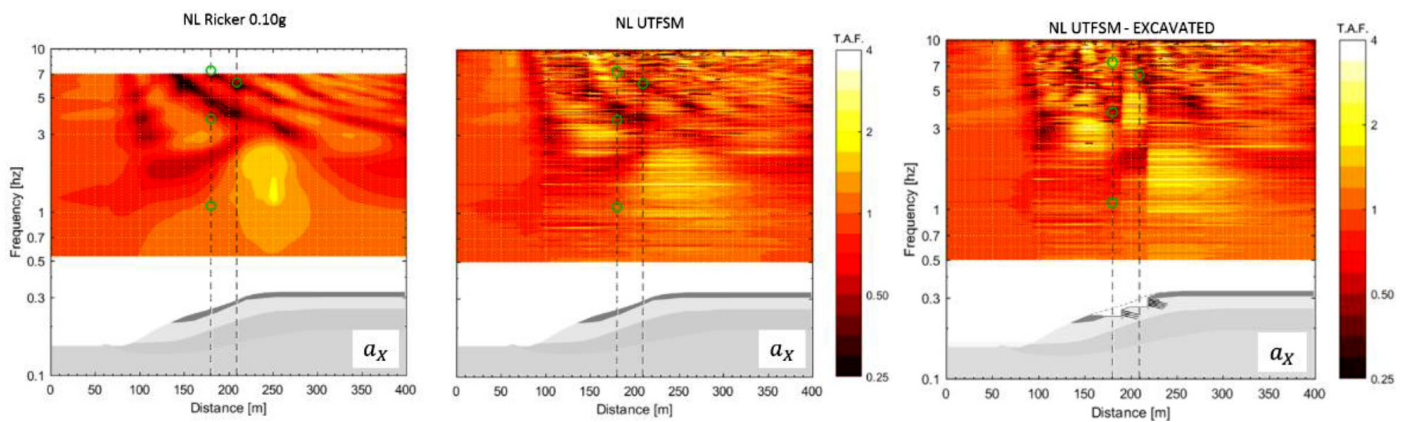


Figura 8: TAF para escenarios de campo libre y escenario excavado.

En la Figura 8 también se muestra el escenario excavado, donde adicionalmente TAF se incrementa en la frecuencia $f = 4.3$ Hz, que corresponde a la frecuencia fundamental del sistema de retención de tierras aproximado como $\left(\frac{v_s}{4h_w} = \frac{\sqrt{0.65}(307) \text{ m/s}}{4(14.5 \text{ m})}\right)$, donde el módulo de degradación de 65% fue estimado para deformaciones cortantes de 0.03% de la masa de suelo de acuerdo a la Figura 3. En resumen, topografías agudas pueden cambiar completamente el TAF para ciertas frecuencias resonantes en zonas particulares. Edificios altos con bajas frecuencias fundamentales deberían ser poco afectados, mientras edificios pequeños con frecuencias fundamentales altas podrían experimentar amplificaciones.

Efectos SSI y SSSI

La Figura 9 muestra que los escenarios SSI y SSSI, en general, son beneficiosos para el edificio alto “A” porque es bastante flexible y está “alejado” de las frecuencias donde los efectos topográficos y de interacción suceden. Sin embargo, para el edificio bajo “P” existen ciertos casos

en los que las respuestas se amplifican inclusive del orden de 80% en el drift de entrepiso. También se observa que la mayoría de los puntos positivos se encuentran sobre la línea diagonal, lo que indica que los efectos beneficiosos SSSI son mayores que el caso SSI; pero desde un punto de visto práctico esta diferencia es despreciable.

En la Figura 10(a) se muestra el primer ratio espectral para el edificio “A” con señales de entrada tipo Ricker, mostrando que la disminución de las frecuencias fundamentales debido a la interacción suelo-estructura es mínima, tal como se espera. Sin embargo, en la Figura 10(b) se muestra que para el edificio “P” con señal de entrada sísmica sobre este acortamiento es de 57%. Esto sucede porque la excavación induce un máximo del TAF alrededor de $f = 4.3$ Hz, cercano a la frecuencia fundamental del edificio “P”, y estas ondas atrapadas bajo el edificio y detrás del sistema de retención de tierras interactúan con el edificio como un efecto de masa agregada (efectos inerciales), cambiando la cinemática del movimiento de este edificio a una forma de “cabeceo”.

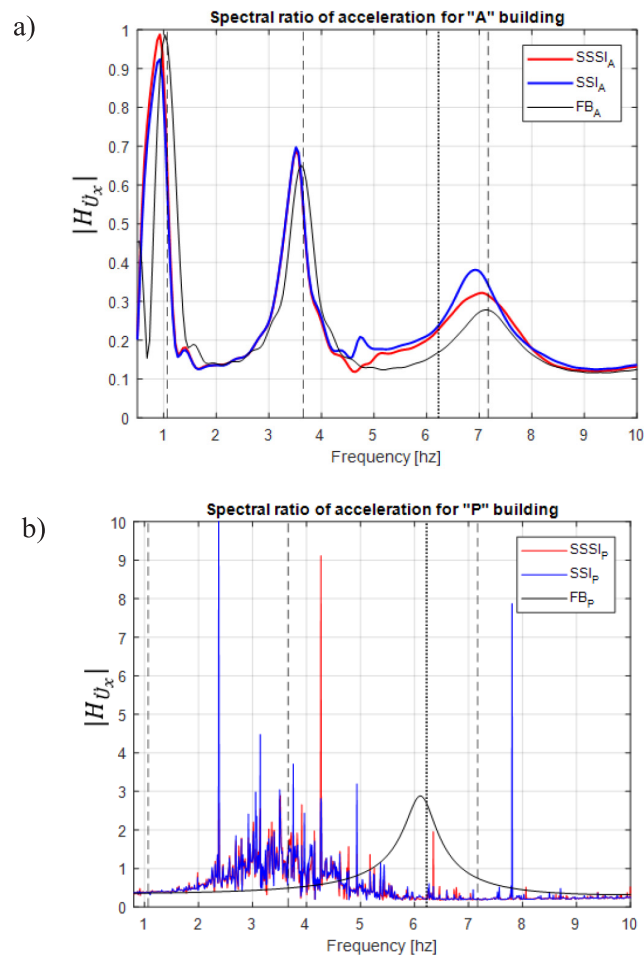
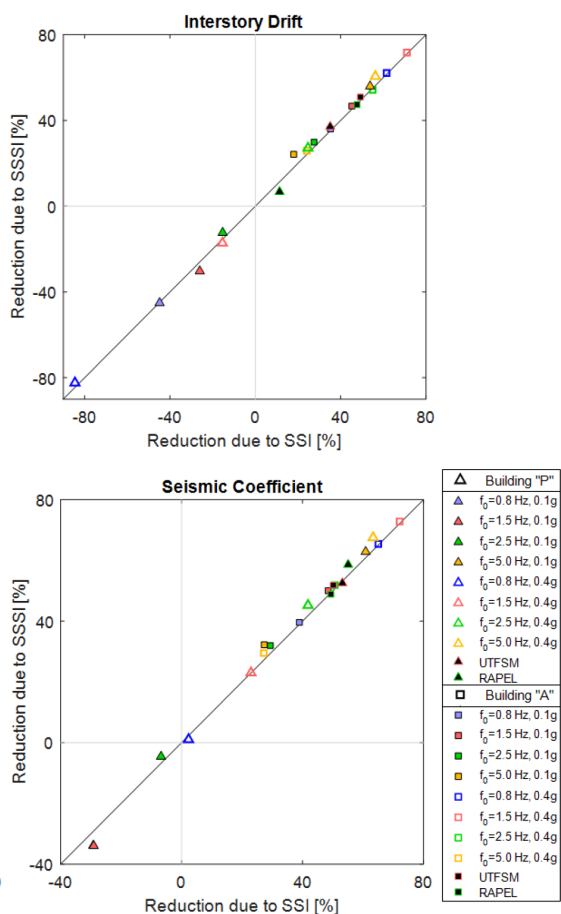


Figura 9: Reducción de respuestas estructurales debido a escenarios SSI y SSSI

Figura 10: Primer ratio espectral para edificio: a) "A" y b) "P"

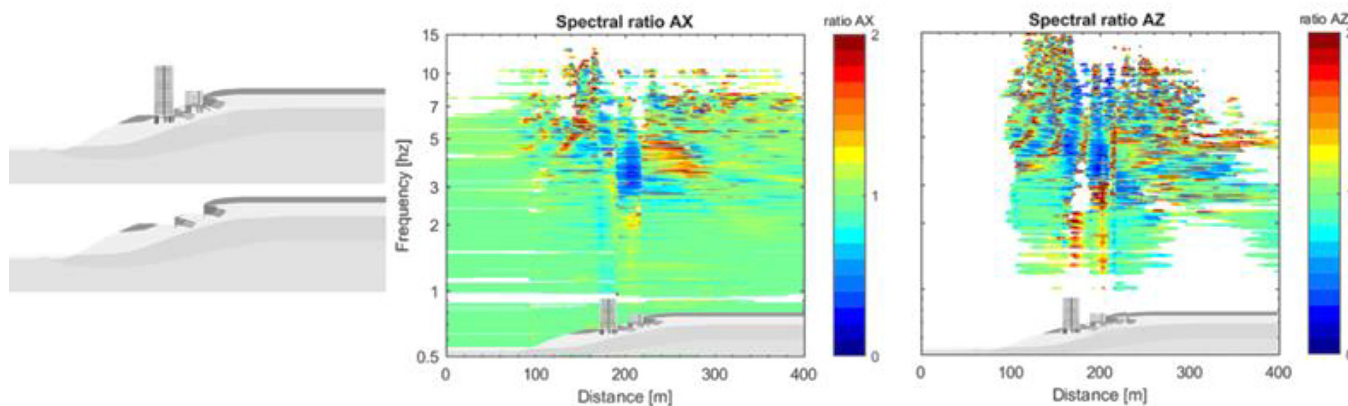


Figura 11: Segundo ratio espectral para edificio "A" y "P".

Finalmente, la Figura 11 muestra el segundo ratio para el escenario SSSI respecto al caso únicamente excavado, donde se observa que los casos de interacción del suelo con las estructuras tienen un rol importante en la reducción de amplitudes de respuesta en las altas frecuencias (contornos

azules), principalmente en la aceleración vertical. Esto se explica en la restricción cinemática que las cimentaciones sobre pilas y micropilotes imponen sobre el suelo de fundación (efectos cinemáticos) y probablemente porque el peso de los edificios agregan confinamiento adicional

al suelo. En las bajas frecuencias, el ratio de aceleración vertical tiende a aumentar porque el suelo agrega masa al sistema (efecto inercial).

Conclusiones

Se estudió la interacción dinámica no-lineal estructura-suelo-estructura para proyectos residenciales típicos ubicados en talud costero arenoso cuya principal motivación fue la falta de reglamentación para topografías del tipo talud costero. Las principales conclusiones de este estudio son.

El perfil topográfico tiene gran efecto en el patrón de propagación de ondas, teniéndose zonas cercanas a la cresta del talud con TAF ≈ 1.8 , sugiriendo que el TAF recomendado en el Eurocódigo 8 puede ser no conservador hasta en un 43% en este caso de estudio, lo que puede cambiar dramáticamente la cinemática del movimiento de edificios rígidos.

La estratigrafía puede modificar la dirección de propagación de ondas de alta frecuencia, reduciendo o amplificando el TAF en zonas específicas.

Los efectos beneficiosos de la SSI son realizados por las cimentaciones profundas.

Los efectos adicionales de la SSSI sobre las respuestas estructurales son despreciables desde un punto de vista práctico.

Proyectos residenciales similares a este caso de estudio deberían prestar mayor atención al diseño de edificios pequeños ubicados detrás de una excavación profunda y cerca de la cresta de un talud.

Finalmente, basados en este caso de estudio, los efectos de la topografía, el sitio y la interacción estructura-suelo-estructura afectan al comportamiento dinámico de estructuras de edificación próximas entre sí, y ubicadas en taludes costeros arenosos. Por esta razón, estos efectos pertenecientes tanto al campo geotécnico como estructural, debieran ser considerados en la etapa de diseño estructural de proyectos de edificación similares a este caso de estudio.

Referencias

- Alitalesh, M., Shahnazari, H. and Baziar, M.H. (2018). Parametric study on seismic topography-soil-structure interaction; topographic effect. *Geotechnical and Geological Engineering* **36**(4), 2649-2666
- Assimaki, D., Kausel, E. and Gazetas, G. (2005). Wave propagation and soil-structure interaction on a cliff crest during the 1999 Athens Earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **25**(7-10), 513-527
- Assimaki, D. and Kausel, E. (2007). Modified topographic amplification factors for a single-faced slope due to kinematic soil-structure interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **133**(11), 1414-1431
- Benz, T. (2007). *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences*. PhD thesis, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, Germany
- Bolisetti, C. and Whittaker, A.S. (2020). Numerical investigations of structure-soil-structure interaction in buildings. *Engineering Structures* **215**, 110709
- EN1998-1 (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium
- Han, B., Chen, S. and Liang, J. (2020). 2D dynamic structure-soil-structure interaction: a case study of Millikan Library Building. *Engineering Analysis with Boundary Elements* **113**, 346-358
- Kausel, E. (2010). Early history of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**(9), 822-832
- Luco, J.E. and Contesse, L. (1973). Dynamic structure-soil-structure interaction. *Bulletin of the Seismological Society of America* **63**(4), 1289-1303
- Menglin, L., Huaifeng, W., Xi, C. and Yongmei, Z. (2011). Structure-soil-structure interaction: literature review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **31**(12), 1724-1731
- Paolucci, R. (2002). Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **31**(10), 1831-1853

- Papageorgiou, A.S. and Kim, J. (1991). Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas Valley with reference to the 29 July 1967 Earthquake: SH Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America* **81**(6), 2214-2233
- Raddatz, D. y Taiba, O. (2018). Estructura de contención usando pilas con anclajes y refuerzo de fundaciones por medio de micropilotes y pilas para proyecto ubicado en Reñaca, Viña del Mar. *X Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, UTFSM, PUCV y SOCHIGE, Valparaíso, Chile, artículo ID1152
- Roesset, J.M. (2013). Soil structure interaction the early stages. *Journal of Applied Science and Engineering* **16**(1), 1-8
- Vicencio, F. and Alexander, N.A. (2018). Higher mode seismic structure-soil-structure interaction between adjacent building during earthquakes. *Engineering Structures* **174**, 322-337
- Westenenk, B., de La Llera, J.C., Jünemann, R., Hube, M.A., Besa, J.J., Lüders, C., Inaudi, J.A., Riddell, R. and Jordán, R. (2013). Analysis and interpretation of the seismic response of RC buildings in Concepción during the February 27, 2010, Chile Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering* **11**(1), 69-91
- Wong, H.L. and Trifunac, M.D. (1975). Two-dimensional, antiplane, building-soil-building interaction for two or more buildings and for incident plane SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America* **65**(6), 1863-1885
- Zhang, Z., Fleurisson, J.A. and Pellet, F. (2018). The effects of slope topography on acceleration amplification and interaction between slope topography and seismic input motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **113**, 420-431